

EV구동용 AC Servo Motor의 운전 제특성에 관한 연구

최장균* 조경재 임중열 차인수

* 동신대학교 전기전자공학과

A Study on operating characteristics of AC Servo Motor for EV driving

Abstract

In this paper various drive characteristics of a AC Servo Motor for EV(electric vehicle) and hybrid system proposed a countermeasure against air pollution are presented. Since the transfer function of the plant is nonlinear and very complicated, there are difficulty in driving the system with real time.

The performance of these experiments is confirmed by computer simulation results. The high performance and high accuracy of the driving system, Field oriented vector control system is proposed.

1. 서론

최근 자동차의 급속한 보급에 따라 배출 가스에 의한 대기오염으로 심각한 사회적인 문제로 대두되고 있으며, 이에 따른 환경 규제가 갈수록 엄격해 지고 있다. 또한 우리 나라와 같은 석유 자원이 거의 없는 국가에서는 배출 가스의 절감 및 에너지의 효율적인 이용이 병행되어야 한다

가솔린과 디젤엔진에 의한 환경오염은 삼원 촉

매 장치의 실용화와 엔진 제어 기술의 발달에 의해 어느 정도 절감이 가능해졌으나 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물의 배출특성은 서로 상반되며, 특히 도심에서의 잦은 급 발진, 급가감속 및 급제동 등의 혹독한 운전 특성상 아직 근본적인 해결책이 마련되지 않은 실정이고, 기존의 엔진으로는 날로 심화되고 있는 환경기준을 만족시키는데는 한계가 있다. 따라서 획기적인 엔진의 개발과 보다 정밀한 제어 방식이 요구되고 있다. 또한 디젤엔진은 배출 가스 저감뿐만 아니라, 동시에 에너지의 절감 및 고효율화를 실현해야 하는 부담이 가중되고 있어 이를 해결할 수 있는 새로운 시스템의 도입이 요구된다.

최근 대형 디젤 차량으로 전자 제어 방식의 고압 연료 분사장치, DPF, 각종 하이브리드 시스템 등을 이용한 저 연비 및 고 출력 차량 개발, 소 중형 승용차량으로 EV(Electric Vehicle) 개발에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 실용화 직전에 있다

또한 하이브리드 차와 전기 자동차에 이용되고 있는 구동장치로는 제어 특성이 선형이고 비교적 제어가 용이하나 정류자편과 브러시로 인한 유지 보수가 어려운 직류 전동기 대신, 제어 특성이 비선형적이고 제어상의 어려움은 따르나, 벡터 제어기법의 도입으로 선형 제어 기법의 도입이 가능하며, 유지 보수가 용이하고 견고한 AC 서보 모터가 많이 이용되고 있는 추세에 있다.

본 연구에서는 EV 구동용 3상 유도 전동기의 제어 시스템을 설계하여 제어 알고리즘에 따르는 전동기의 토크, 전류, 속도 제어 특성을 시뮬레이션을 통하여 비교 검토하고자 한다

AC서보 드라이버가 우수한 제어 성능을 내기 위해서는 정밀 토크 제어가 요구되며 따라서 정밀한 전류 제어가 필수적이다. 또한 PWM 인버터에서 출력하는 전압 파형의 정밀도도 정밀 토크 제어에 큰 영향을 끼친다.

본 연구에서는 속도 변수 및 토크 제어를 위한 컨트롤러로 80C196KC를 이용한 시스템을 구성하고자 하였다.

II. AC 서보 모터의 원리, 구조 및 토크 특성

2.1 AC 서보 모터의 원리

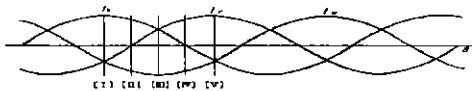
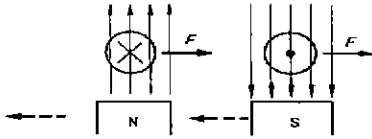


그림 1. 모터의 원리

계자 중에 놓은 도체에 그림의 방향으로 전류를 흘린 경우, 플레밍의 왼손 법칙에 의하여 도체로는 화살표 방향으로 힘이 발생한다. 도체가 고정되어 있는 경우는 그 반작용으로서 자석이 점선으로 나타낸 화살표 방향으로 움직인다. 이때 자석의 동작에 맞춰 도체도 상대 위치는 언제나 일정하며, 따라서 자석에는 한결같은 힘이 연속적으로 작용하여 움직인다. 3상권선 U,V,W 에 흐르는 전류 I와 직교하는 계자 자속 밀도 B로 하여 각 상에 나타나는 것을 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$B_u = B \cdot \cos(\theta)$$

$$B_v = B \cdot \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$B_w = B \cdot \cos(\theta - 240^\circ)$$

이 때의 각각의 전류 위치 I_u, I_v, I_w 를 자극 회전각 θ 에 대해

$$I_u = I \cdot \cos(\theta)$$

$$I_v = I \cdot \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$I_w = I \cdot \cos(\theta - 240^\circ)$$

가 되도록 제어하면 발생 토크 T는

$$T = k (B_u \cdot I_u + B_v \cdot I_v + B_w \cdot I_w) = \frac{3}{2} k \cdot B \cdot I$$

여기서,

B : 자속 밀도(피크값)

θ : 자극 중심과 U상 코일의 회전자

I : 전류(피크값)

u,v,w : U, V,W상의 여러 요인

k : 상수

가 되어, 회전자 θ 와 상관이 없게된다. 즉, 자극의 자속 분포를 정현파로 하여 자극의 회전 위치에 맞추어서 정현파의 전류 위상을 제어하면 DC 서보 모터와 같이 자속과 전류의 곱에 비례하는 일정 토크를 발생하는 AC 서보 모터가 된다.

2.2 AC 서보 모터의 구조

DC 서보 모터에는 브러시와 정류자가 반드시 존재하지만 AC 서보 모터에는 없으며, 따라서 신뢰성이 높은 구조가 되고 있다.

SM형 AC 서보 모터에 대해서는 계자(영구 자석)와 전기자 코일이 DC 서보 모터에 대해 반전하고 있으며, 고정자측에 전기자 코일을 배치함으로써 냉각 방법에는 연구가 필요하다.

IM형 AC 서보 모터는 범용 인덕션 모터와 동일한 구조이고 회전자는 알루미늄 제품의 바구니형 로터이며, 견고한 회전자 구조로 되어 있다.

AC 서보 모터에는 구조적으로 정류자는 존재하지 않지만 그것 대신에 검출기가 반드시 AC 서보모터와 쌍으로 사용된다.

(SM형 AC 서보 모터-자극 센서)

(IM형 AC 서보 모터-속도 센서)

SM형 AC 서보 모터는 계자(영구 자석)와 동기의 전기자 전류를 흐르게 함으로써 연속된 토크를 발생시키고 있으며, 이 때문에 영구 자석의 위치(회전각)를 정확히 피드백하는 자극 센서가 필요하다.

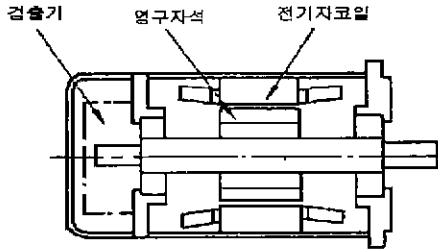


그림 2. SM형 서보모터

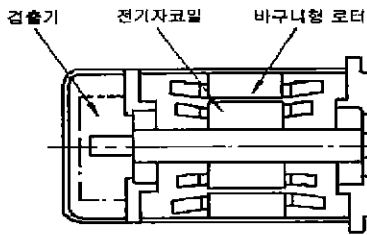


그림 3. IM형 서보모터

IM형은 AC 서보 모터는 2차 전류에 비례한 토크를 발생시키기 위해서는 슬립 주파수의 검출이 필요하고 이 때문에 회전자의 속도를 정확히 피드백하는 속도 센서가 필요하다.

2.3 구동원리

서보 모터에 부착된 속도 검출기의 속도 신호와 속도 지령을 대조하여 전류의 진폭을 준다. 또 자극 위치 검출기에서의 각도 신호에서 서로간의 전류 위상을 만들어 진폭 값과 맞추어 기준 전류 신호로 한다. 이 기준 전류 신호와 전류 피드백 신호를 대조해서 PWM(펄스폭 변조)제어의 게이트 신호를 만든다.

다음에, 검출기로서 리플버(회전각도 검출기)를 사용한 각도(위치)·속도 검출 회로를 설명한다

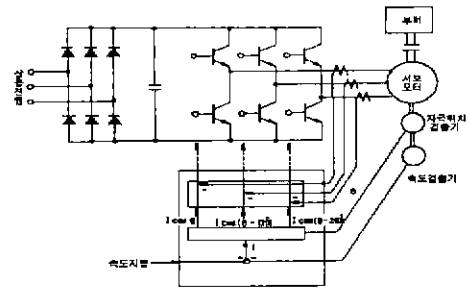


그림 4. AC 서보모터의 구동원리

여자 회로에서 2상의 여자를 넣으면 리플버측의 회전각 시프트한 신호가 얻어진다. 이 출력 신호와 기준 발진 신호와의 위상 비교를 하고 위상차에 따른 전압 신호를 만들어 전압 제어 발진기(VCO :Voltage Control Osillator)에 주면, VCO에서는 이 전압에 따른 주파수를 출력한다. 이것을 여자 회로에 기함으로써 기준 발진 회로와 리플버 출력 위상이 항상 일치하도록 VCO의 주파수, 위상이 변화하므로 VCO주파수에서 속도와 또 VCO출력과 기준 발진 회로의 위상 어긋남에서의 회전 위치가 얻어진다. 이와 같이 리플버 1개로 자극 위치 검출, 속도 검출, 회전 위치 검출이 모두 가능하다. 다른 방식에서는 자극 위치 검출기와 위상 검출의 엔코더 또는 속도 검출의 타코 제너레이터(회전수발신기)를 조합해서 사용할 필요가 있는데, 최근에는 복합형인 여러 가지 검출기가 사용되고 있다.

리플버의 특징으로서는,,

- ① 구조가 간단하고 같으므로 견고하고 내열성도 우수하다.
- ② 전송 신호가 엔코더에 비해 저주파인 정현파이기 때문에 노이즈에 강하다.
- ③ 신호 처리 회로가 복잡하다.

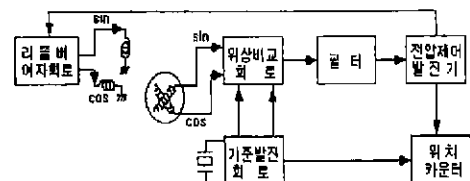


그림 5. PLL리플버 위치, 속도검출방식

2.3.1 AC 서보 모터의 제어장치

제어 장치는 크게 나누어 파워부와 제어부로 구성되며, 제어부에는 여러 가지의 보호 기능이 포함되어 있다.

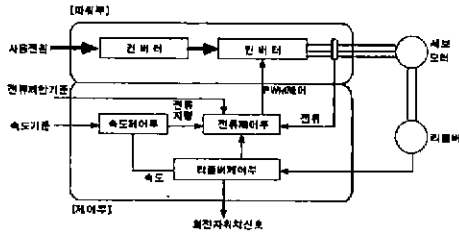


그림 6. AC서보모터의 제어장치

(1) 파워부

파워부는 컨버터부, 회생 전력 흡수부, 인버터부의 3개 부분으로 구성되어 있다.

컨버터부는 상용 전압(교류)을 정류하여 직류로 변환하는 다이오드 브리지와 평활 콘덴서로 구성되어 있다.

회생 전력 흡수부는 회생 운전에 의해 부하에서 되돌아가는 전력을 우선 콘덴서에 흡수하고 콘덴서 전압이 일정치를 넘으면 트랜지스터가 ON하여 저항에 의해 회생 전력을 열로 소비한다.

인버터부는 직류 전원원에서 임의의 주파수의 정현파 전류를 PWM 제어에 의해 만들고 있다.

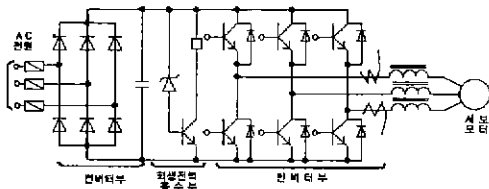


그림 7. 서보모터의 파워부

(2) 제어부

제어부는 속도 제어부, 전류 제어부, 리플버 제어부, 그리고 보호 회로로 나뉜다.

리플버 제어부에는 구동 원리에서 설명한 것과 같이 리플버를 사용해서 회전 각도와 회전

속도 신호를 만든다. 속도 제어부에서는 이 회전속도를 피드백하여 속도 기준과 대조하여 가속 또는 감속을 위한 전류 전폭을 결정한다. 전류 제어부에서는 이 전류 전폭과 리플버 제어부에서의 회전각도 신호에 의해 각상의 전류 기준 신호를 만들어 전류 피드백 신호와 인버터부의 각상 트랜지스터의 ON, OFF를 제어한다.

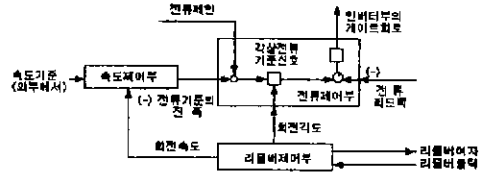


그림 8. 서보모터의 제어부

2.4 AC 서보모터의 토크 특성

그림 9는 영구 자석에 의한 가자력원을 일정한 전류원에 의한 것처럼 생각하여 AC Servo Motor를 등가적으로 표현한 회로이다.

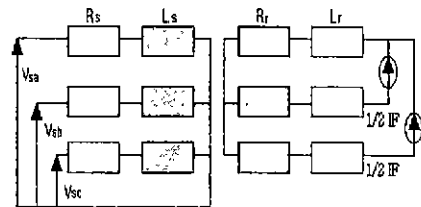


그림 9 서보모터의 등가회로

2.4.1 전압 및 전류 합성치

가) 고정자측의 전압 및 전류 합성치
a상을 기준으로한 합성 인가 전압 $V_s(t)$ 를 벡터 합성법을 이용하여 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_{sa}(t) + a V_{sb}(t) + a^2 V_{sc}(t) \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2} V_s e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

(단, $I_s = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_s e^{j\omega t}$ 이다.)

고정자측 전류의 합성치를 $i_s(t)$ 라 두고 전압의 경우와 마찬가지로 전류의 합성치를 구해 보면

다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} i_{sa}(t) &= i_{sa}(t) + ai_{sb}(t) + ai_{sc}(t) \quad (2) \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2} I_s e^{j\omega t} \end{aligned}$$

↳ 회전자축의 전압 및 전류 합성치
회전자축 전류의 합성치를 $i_r(t)$ 라 두면 고정
자의 경우와 마찬가지로 $i_r(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{ra}(t) &= i_{ra}(t) + ai_{rb}(t) + ai_{rc}(t) \quad (3) \\ &= \frac{3}{2} I_F \end{aligned}$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 회전자축의 가상 전
류의 합성치가 시간에 관계없이 항상 일정한
값으로 된다.

2.4.2 합성치를 이용한 전압 방정식

합성자속을 $\Phi_s(t)$ 라 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Phi_{sa}(t) &= \phi_{sa}(t) + a\phi_{sb}(t) + a\phi_{sc}(t) \quad (4) \\ &= L_s i_s(t) + M i_r(t) e^{j\theta} \end{aligned}$$

전압, 전류, 자속 등의 합성치들에 대한 관계
식을 구하면 다음과 같다.

$$V_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{d\Phi_s(t)}{dt} \quad (5)$$

식(5)에 식 (4)을 대입하면 전압 및 전류의 합
성치에 대한 방정식은 결국 다음식으로 된다.

$$V_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{d}{dt} [L_s i_s(t) + M i_r(t) e^{j\theta}] \quad (6)$$

2.4.3 2상 좌표계에서의 전압 방정식

과도 상태 등의 해석을 위해 잘 사용되는 2상
좌표계는 고정자축을 기준으로 하는 고정 좌표
($\alpha-\beta$) 계와 동기 속도로 회전하는 회전 좌표
($d-q$)계로 나누어진다. 그림 2는 고정 좌표
($\alpha-\beta$)과 회전 좌표 ($d-q$)축의 관계를 나타
낸 것이다.

평형3상 입력의 회전 좌표계로의 변환 및 역
변환은 다음과 같이 된다.

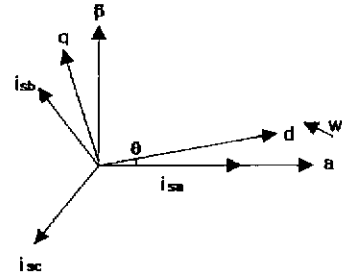


그림 10. 2상 좌표

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta-\gamma) & \cos(\theta+\gamma) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta-\gamma) & -\sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta-\gamma) & -\sin(\theta-\gamma) \\ \cos(\theta+\gamma) & -\sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

III. 시뮬레이션 및 결과 검토

시뮬레이션에 사용된 AC 서보 전동기의 파라
미터는 표1과 같다.

표1. AC Servo 전동기의 사양

정격 출력	850W	순시최대전류	100/170A
정지 토크	105kg.cm	전기자 저항	0.78/0.28Ω
정격 회전수	1000RPM	유기전압상수	95/56 5.0
정격 전압	100/60 V	토크 상수	9.2/5.5 kg.cm/A
정격 전류	11/18 A	기계적시간상수	10 m.s
순시최대토크	800kg.cm	전기적시간상수	4.7 m.s

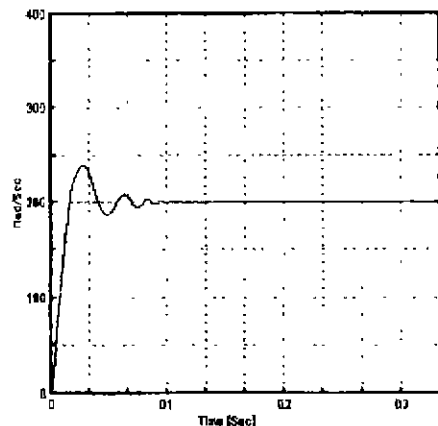


그림11 P 제어거일 때의 속도응답

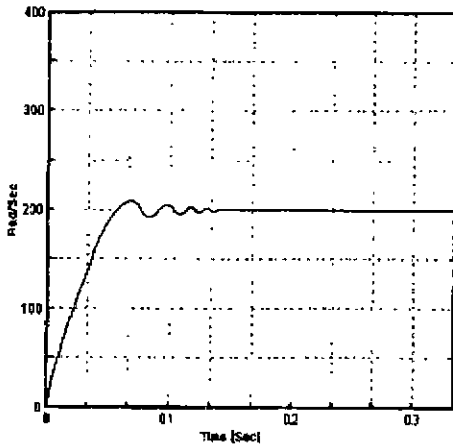


그림 12. PI 제어기일 때의 속도응답

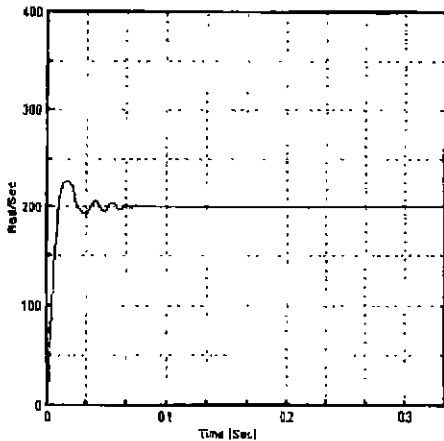


그림 13. PD제어기일 때의 속도응답

그림 11, 그림 12, 그림 13은 표 2의 파라미터를 사용하여 AC 서보 모터를 제어기 P, PI, PD를 통해 시뮬레이션을 비교한 것이다. P, PD 제어기를 상승 시간이 PI에 비해 빠르지만 상대적으로 큰 오버슈트가 생긴다.

그림 14는 제어기가 없을 때, 그림 15는 P제어기일 때, 그림 16은 PI 제어기 일 때, 그림 17은 PD제어기일 때의 AC 서보 모터의 속도 응답 특성에 관한 그림이다. 각 실험의 파형은 AC 서보 모터가 가동을 시작하여 0.3초까지 측정치이며 기준 속도는 실험을 통하여 얻은 가장 안정된 속도인 760rpm으로 하였다. 제어기가 없을 때의 속도 응답은 큰 진동이 발생한 후 지속되고 있으며, P제어기를 채택하였을 때

의 속도 응답을 측정 한 것으로 비교적 큰 오버슈트가 발생하고 있다.

그림 17과 같이 PD 제어기를 채택하였을 때의 AC 서보 모터의 속도 응답 측정 파형은 비교적 안정되어 있으나 전체적인 오버슈트가 발생하였다. 그림 13과 같이 PI 제어기를 채택했을 때의 AC 서보 모터의 속도 응답 측정 파형은 약간의 오버슈트가 발생하며 상승 시간이 비교적 느리고 점정 시간에 도달하는 시간도 늦다.



그림 14. 제어기가 없을 때의 속도 응답([200rpm/div], [50m.ses/div])

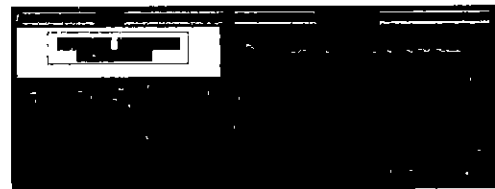


그림 15. P제어기일 때 속도 응답 특성([200rpm/div], [50m.ses/div])

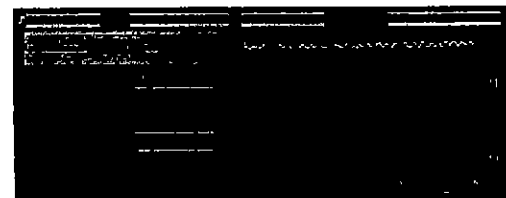


그림 16. PI 제어기일 때 속도 응답([200rpm/div], [50m.ses/div])



그림 17. PD 제어기일 때 속도 응답([200rpm/div], [50m.ses/div])

V. 결 론

실험 파형에서 보듯이 제어기의 종류에 따라 속도 수렴이 고유의 특성과 장단점을 가지고 있어서 신속 정확한 제어를 위해서는 계측 및 제어기법의 보완이 필요함을 알 수 있다.

현재 전기자동차에 적용되고 있는 추세는 유지, 보수 등의 단점 때문에 종래의 DC 모터에서 인버터, DSP(Digital signal processor), IGBT 등을 이용한 벡터제어 유도전동기로 변화 및 실용화 되고 있으며, 벡터제어기법. 중에서도 추정 알고리즘을 이용한 센서리스 벡터제어 기술에까지 발전하고 있는 단계에 있는 실정이다. 반도체기술의 발달과 더불어 지구환경 보호차원에서 자동차배출가스의 규제가 점점 가혹화되고 전기자동차의 실용화가 빨라질 것으로 보이며, 벡터제어의 여러 가지 기법에 관한 연구 및 기술발전이 활발하게 이루어질 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Y. Dote and S. Kinoshita. Brushless Servo Motor Fundamentals and Applications, Oxford Science Publications, 1990
2. Rlessmeier, et al, " Microprocessor-controlled AC Servo Drives with Synchronous or Induction Motors : Which is preferable?", IEEE-IAS Annual Meeting Conf. Records, 1985
3. Joachim Holtz, "Optimal Plusewidth Modulation for AC Servos and Low-Cost Industrial Drives" IEEE-IAS 92, 1992, pp.1010-1018
4. In-Su Cha Hea-Am Park & et all "A Study on Design and Characteristic of the High Frequency Resonant Inverter for Ultrasonic Motor Drive Using Fuzzy Controller" IECON'95, Orlando, Florida, USA, PP.680-685, November 1995
5. Takeshi Hatsuzawa etal " Speed control Characteristics and digital servo system of a circular traveling wave moto" Rev. Sco/ Omstri, 57(11), pp.1886-1891, November 1986.

6. 이광형, 오길록, " 퍼지이론 및 응용", 홍릉출판사, 1991